نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی
جلد ۳۴، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹، ص. ۳۵۶-۳۴۱

Journal of Agricultural Economics and Development
Vol. 34, No. 3, Fall 2020, p. 341-356

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی پیامدهای درونی‌سازی اثرات جانبی آلودگی آب بر مدیریت کمی و کیفی حوضه آبریز زاینده‌رود

حدیث کاوند[۱]- سامان ضیائی[۲]*- مصطفی مردانی نجف‌آبادی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۶

چکیده

بروز چالش‌های اخیر در وضعیت منابع آبی حوضه آبریز زاینده‌رود، منجر به آن گردیده است که زاینده‌رود نیز از آلودگی آب در امان نماند و تامین آب با کیفیت مناسب به عنوان یک چالش اساسی در این حوضه محسوب گردد. از این‌رو ارائه یک الگوی کشت هدفمند از طریق کاهش اثرات جانبی آلودگی مصرف آب ناشی از فعالیت‌های کشاورزی برای حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود می‌تواند نقش موثری در مدیریت کمی و کیفی منابع آب حوضه ایفا نماید. برای این منظور مدل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی (مدل WEAP) با مدل بهینه‌یابی اقتصادی تلفیق و در مرحله‌ی بعد، اثرات جانبی آلودگی آب با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی و به‌عنوان ورودی و یک محدودیت زیست‌محیطی به مدل یکپارچه سطح حوضه اضافه شده است. داده‌های مورد نیاز این الگو به سه شیوه تحقیق پیمایشی، مطالعات و گزارشات اسنادی و استفاده از نظرات کارشناسان و خبرگان طی سال‌های آماری ۹۱-۱۳۹۰ جمع‌آوری شد. نتایج پارامترهای هیدرولوژیکی در الگوی بهینه اقتصادی نشان داد که می‌توان با بکارگیری سیاست‌های حفاظت منابع آب، اثرات تغییر اقلیم در منطقه را تعدیل بخشید. همچنین مقایسه الگوی بهینه اقتصادی و اقتصادی-زیستی نشان داد که می‌توان ضمن بهبود بازده برنامه‌ای به میزان ۱۲ میلیون ریال، میزان تلفات نیترات کمتر از حد مجاز در سطح حوضه را تحقق بخشید.

واژه‌های کلیدی: آلودگی آب، الگوی بهینه کشت، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، مدل یکپارچه اقتصادی-زیستی

مقدمه

کمبود منابع آب مهم‌ترین مسئله‌ای است که بشر در قرن ۲۱ با آن مواجه می‌باشد (۱۶ و ۷). از آنجایی که در کشور ایران، بخش کشاورزی بیشترین درصد مصرف منابع آبی را به خود اختصاص می‌دهد، لذا توجه به مدیریت آب در این بخش از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و تخصیص آن در یک حوضه آبریز اغلب یکی از بحث‌های مهم مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی می‌باشد (۲۶). افزایش تقاضای آب، بالا رفتن سطح زندگی و گسترش آلودگی منابع آب در اثر توسعه فعالیت‌های کشاورزی، شهری و صنعتی منجر به آن گردیده است که کیفیت آب در بسیاری از نقاط با خطر جدی مواجه گردد و لذا مدیریت معقول و منطقی آن را بسیار دشوار و پیچیده نموده است (۳۴ و ۱۹).

در دهه‌های اخیر، نگرانی از آلودگی آب ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و پیامدهای آن در حال افزایش است (۲۷). مصرف بی‌رویه کودهای نیتروژنه توسط کشاورزان و به دنبال آن تخلیه نیترات از منابع کشاورزی منتشرکننده، تأثیرات بلندمدتی بر منابع آب زیرزمینی و سطحی دارد و وضعیت آن‌ها در شرایط نامناسبی از نظر کمی و کیفی قرار داده است (۲۹). مقررات موجود برای محدود کردن آلودگی بخش کشاورزی و دستیابی به پیامدهای مطلوب زیست‌محیطی کافی نیست. بنابراین ابزارهای اقتصادی به طور فزاینده‌ایی به عنوان راهی مقرون به صرفه برای محدود کردن آلودگی پیشنهاد شده است (۳۳). بنابراین اثرات جانبی مصرف آب در بخش کشاورزی، مسئله‌ای حیاتی برای کنترل و مدیریت آلودگی آب است (۲۹).

به منظور مدیریت هر چه بهتر کمی و کیفی منابع آب با توجه به روند توسعه هر یک از واحدهای مصرف‌کننده، تعیین سهم هر یک از مصرف‌کنندگان در آلودگی رودخانه در کل حوضه ضروری می‌باشد. در بسیاری از موارد غلظت بالای نیترات در آب‌های زیرزمینی به صورت یک آلاینده انتشاری ناشی از کشاورزی است و با میزان کوددهی در ارتباط است (۲۷). اثرات جانبی این آلودگی شامل تحمیل هزینه‌های اجتماعی، کاهش بازده کشاورزی، ایجاد خطر برای حیات

---

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل
(*- نویسنده مسئول: Email: samanziaee@uoz.ac.ir)
۳- استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

DOI: 10.22067/jead2.vi0.86889

آبزیان، حیوانات و گیاهان و مشکلاتی در تهیه آب آشامیدنی می‌باشد (۲۲).

مطالعات در مورد اثرات زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی بر روی آب، خاک و هوا نیز افزایش یافته است (۴۲). رشد کشاورزی در ایران، همراه با افزایش مصرف آب (۲۱)، استفاده بیشتر از کودهای شیمیایی (۱۶) و آلودگی منابع آب (۳۱) بوده است. موضوع آلودگی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی در ایران یکی از مهم‌ترین چالش‌های بخش کشاورزی در طی دو دهه گذشته بوده است. این مسئله پایداری کشاورزی در ایران را به مخاطره انداخته است (۲۵). در چین از دهه ۱۹۹۰، نیاز به بررسی فاکتورهای محیطزیستی در فرایند تصمیم‌گیری مدیریت منابع آب، توسط کارشناسان و مقامات به رسمیت شناخته شده است (۱۶). میمی و سوالهی (۱۹) روش بهینه‌سازی مبتنی بر جمع وزنی ساده با لحاظ معیارهای مختلف تخصیص بهینه منابع آب رودخانه اردن، به کار گرفتند. ونگ و همکاران (۴۰) از مدل تخصیص آب مشارکتی برای تخصیص کارا و منصفانه آب بین استفاده‌کنندگان رقیب در حوضه آبریز واقع در کانادا بهره گرفتند. (۱۶)، مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای برای مدیریت منابع آب در کانادا را ارائه نمودند. هان و همکاران (۱۰) در شهر دالیان، مدل توسعه‌یافته‌ای جهت تخصیص منابع آب با کیفیت‌های متفاوت به مصرف‌کنندگان شهری، کشاورزی و صنعتی با هدف حداکثر کردن منافع اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ارائه کرده‌اند. در زمینه‌ی مدیریت کیفیت منابع آب، پی و زائو (۲۵) در چین ارزیابی ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی توسط آفت‌کش‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. اکبری و همکاران (۱) در حوضه ارس اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه را با استفاده از مدل ارزیابی آب و خاک[۱] بررسی نمودند. در زمینه مدیریت کیفی حوضه و مخزن سد سمیره، باقری راهدانه و همکاران (۵) به تعیین سهم بار نیتروزن و فسفر در زیرحوضه‌های مخزن سد سمیره پرداختند. شیخ زین‌الدین (۳۱) با استفاده از ابزار شبیه‌سازی SWAT و با توجه به الگوی کشت، شرایط اقلیمی منطقه و نوع خاک، میزان اثرات جانبی آلودگی آب شامل نیترات و فسفات در حوضه آبریز سد درودزن را شبیه‌سازی و مقادیر شبیه‌سازی را به‌عنوان ورودی به مدل برنامه‌ریزی اقتصادی اضافه نمود و به تخصیص بهینه آب به زیر بخش‌های کشاورزی پرداختند. نارولا و همکاران (۲۲)، در تحقیقی توزیع مکانی و زمانی موجودیت آب، شامل تغذیه آب زیرزمینی و کیفیت (بارگیری غیرنقطه‌ای نیترات) را در حوضه هیمالایا در بالادست حوضه یامونا ارزیابی کردند.

امروزه برای شبیه‌سازی دقیق شرایط هیدرولوژیکی سطح حوضه با در نظر گرفتن تمامی عوامل اقلیمی، خاک، محصول، نوع آبیاری و ارتباط منابع آب سطحی و زیرزمینی از ابزار برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب[۲] در سطح گسترده‌ای بهره گرفته می‌شود. مدل WEAP توسط مؤسسه محیط‌زیست استکهلم برای استراتژی‌های مدیریت آب مبتنی بر اصل حسابداری تعادل آب همراه با اولویت‌بندی تقاضا و ترجیحات عرضه طراحی شده است (۴۲). در مطالعات داخلی، یزدان‌پناه و همکاران (۴۴) با استفاده از مدل WEAP در حوضه ازغند استان خراسان رضوی نشان دادند که با تغییر الگوی کشت یا تغییر سطح زیر کشت اراضی کشاورزی شرایط تعادل آب زیرزمینی محقق خواهد شد. امینی و همکاران (۳) با استفاده از مدل WEAP به ارزیابی مدیریت منابع آب در حوضه گاماسیاب استان کرمانشاه پرداختند. زین‌الدینی و همکاران (۴۵) به کاربرد مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی جهت ارزیابی گزینه‌های مختلف اقلیمی و مدیریتی در سامانه منابع آب در سد ستارخان پرداختند. یانگ و همکاران (۴۲) با استفاده از مدل WEAP به ارزیابی کمبود آب در حوضه آبریز پکن پرداختند.

حوضه آبریز گاوخونی یا زاینده‌رود به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز در فلات مرکزی با مساحتی بیش از ۴۲ هزار کیلومتر مربع واقع شده است از کل مساحت این حوضه ۵۷ درصد را دشت و مابقی آن را کوهستان‌ها یا دره‌ها تشکیل می‌دهند. متوسط بارندگی حوضه ۱۳۰ میلیمتر و میانگین درجه حرارت ماهانه بین ۳ تا ۲۹ درجه سانتیگراد متغیر است (۲۸). رودخانه زاینده‌رود اصلی‌ترین منبع آب استان اصفهان است که سالانه حجم بسیاری از آب این رودخانه برای آبیاری اراضی حوضه مصرف می‌شود که با توجه به راندمان پایین آبیاری (به طور متوسط ۳۶ درصد) و همچنین عدم حفظ حریم رودخانه در مسیر رودخانه زاینده‌رود، مقدار زیادی از آن که دارای آلودگی نسبتاً زیادی می‌باشد، مجدداً به رودخانه باز می‌گردد. بروز خشکسالی‌های اخیر و به دنبال آن محدودیت منابع آبی حوضه آبریز زاینده‌رود، رشد بی‌رویه برداشت‌های آب زیرزمینی، تمرکز جمعیت به همراه توسعه صنایع و فعالیت‌های کشاورزی در حاشیه رودخانه زاینده‌رود، منجر به آن گردیده است که زاینده‌رود نیز از آلودگی آب در امان نماند و تامین آب با کیفیت مناسب به عنوان یک چالش اساسی در این حوضه محسوب گردد (۱۱). لذا هدف از مطالعه‌ی حاضر بررسی اثرات جانبی آلودگی بر منفعت کشاورزان در محدوده مطالعاتی و ارائه راهبردهای مدیریتی کمی و کیفی تحت مدل بهینه‌سازی اقتصادی-هیدرولوژیکی-زیستی تدوین شده می‌باشد. بدین منظور از ابزار WEAP جهت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی سطح حوضه استفاده و سپس با مدل اقتصادی حداکثرسازی منافع خالص تلفیق گردیده است. برخلاف مطالعات مروری در زمینه مدل‌سازی یکپارچه اقتصادی-هیدرولوژیکی (۲۳ و ۲۴)، علاوه بر در نظر گرفتن پیوند اجزای هیدرولوژیکی منابع آب سطحی و زیرزمینی

1- Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

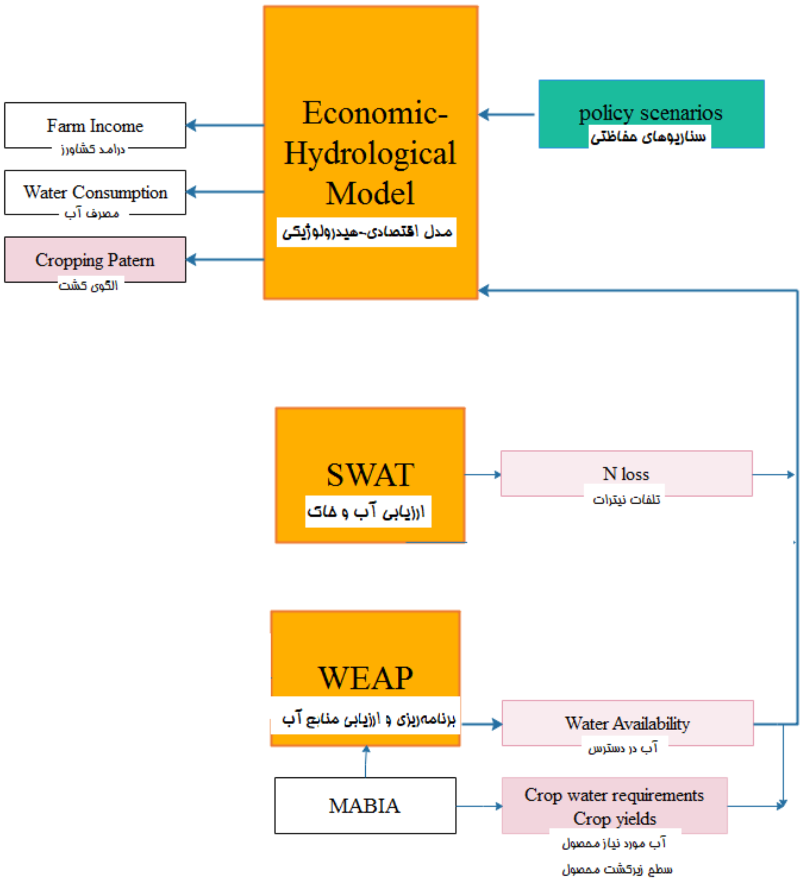
2- Water Evaluation and Planning System (WEAP)

حوضه به شرایط آب و هوایی، خاک و اطلاعات محصولی از جمله تاریخ کاشت، برداشت، طول دوره رشد و ضرایب پاسخ عملکرد محصول نیز توجه شده است. همچنین در این مطالعه به منظور مدیریت کیفی منابع آب از مدل SWAT استفاده شده است. مرور مطالعات مختلف در این زمینه نشان می‌دهد که در تعدادی از مطالعات تنها به شرایط پایداری زیست‌محیطی حوضه در آینده توجه شده است. در تعدادی دیگر از مطالعات، تنها هدف زیست‌محیطی کاهش آلودگی مورد توجه گرفته است و در اکثر مطالعات مروری به درونی‌سازی اثرات جانبی آلودگی توجه نشده است. به عبارتی در مدل حاضر تمامی مسائل اقتصادی، هیدرولوژیکی و اثرات جانبی آلودگی در مدل لحاظ شده است که تا کنون چنین الگوی جامعی در سطح حوضه پیاده‌سازی نشده است. لازم به ذکر است که حوضه مطالعاتی پژوهش حاضر شامل هفت زیرحوضه و ۲۰ واحد هیدرولوژیکی می‌باشد که واحدهای هیدرولوژیک بن-سامان، نجف آباد، اصفهان-برخوار، مهیار شمالی و لنجانات، واحدهای مطالعاتی هستند که به طور مستقیم تحت تأثیر رودخانه زاینده‌رود (پایین دست سد زاینده رود) قرار می‌گیرند و به عنوان منطقه مطالعاتی در پژوهش حاضر درنظر گرفته شده است.

مواد و روش

چارچوب مدل‌سازی

همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است ابتدا با استفاده مدل WEAP و ابزار MABIA به شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و ارزیابی سناریوهای تغییر اقلیم در سطح حوضه پرداخته شده است.



شکل ۱- چارچوب کلی جهت مدیریت کمی و کیفی منابع آب

Figure 1- General Framework for quantitative and qualitative management of water resources

داده‌های شبیه‌سازی شده میزان آب در دسترس (عرضه آب) هر منطقه در سطح حوضه، به‌عنوان ورودی مدل اقتصادی-هیدرولوژیکی سطح حوضه وارد شده و پس از حل این مدل الگوی کشت بهینه مشخص شده است. در مرحله‌ی دوم با اضافه کردن محدودیت کاهش اثرات جانبی آلودگی به مدل بهینه اقتصادی، مدل مجدداً حل و تخصیص بهینه آب بین محصولات مختلف مشخص گردید (مدل

اقتصادی–زیستی). در ادامه، هر یک از مدل‌ها و ابزارهای به‌کار رفته در این تحلیل به‌طور جزیی تشریح شده است.

مدل WEAP جهت شبیه‌سازی هیدرلوژیکی

مدل WEAP، یک ابزار برنامه‌ریزی منابع آب است که بر اصل توازن آب استوار می‌باشد و زیرحوضه‌های مختلف، گره‌های تقاضای آب، زیرساخت‌ها، جریان‌های آب و کانال‌های انتقال آب که همگی با یکدیگر مرتبط هستند را نشان می‌دهد (۳۶). این مدل یک معادله تعادل جرم آب، برای هر گره و اتصال در سیستم در گام‌های زمانی را حل می‌کند. آب برای تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان و میزان جریان پایین دست، بر اساس اولویت نیازها، برتری منبع، معادله تعادل جرم و سایر محدودیت‌ها، توزیع می‌شود (۳۶).

مدل بهینه‌یابی اقتصادی و محدودیت‌های هیدرولوژیکی

در این مطالعه سیستم مدیریت منابع آب حوضه آبریز زاینده‌رود براساس یک الگوی اقتصادی–هیدرولوژیکی مدل‌سازی شده است. مورد استفاده در این مطالعه، برگرفته از مطالعات اخیر نیکویی و همکاران (۲۴) و نیکویی و وارد (۲۳) وارد و گوهر و همکاران (۳۹ و ۹) در خصوص تجزیه و تحلیل حوضه‌ی آبریز می‌باشد. در این مدل میزان آب در دسترس زیرحوضه‌های مختلف با استفاده از مدل WEAP برای افق ۲۰۴۰، به عنوان ورودی‌های مدل اقتصادی می‌باشند. این مدل دارای تعدادی محدودیت‌های هیدرولوژیکی، زمین و نهادی و تابع هدف حداکثرسازی مجموع بازده برنامه‌ای کشاورزان می‌باشد.

این الگو شامل توابع هیدرولوژی، تخصیص زمین، ظرفیت‌های انتقال و بهره‌برداری از منابع و تابع هدف حداکثرسازی ارزش حال خالص مجموع منافع مختلف کشاورزی در سطح حوضه می‌باشد که به صورت روابط زیر ارایه شده است.

$$Max_{LX} \qquad NPV = \left(\sum_{u} \sum_{t} \left(\frac{TBu_{agr,urb,ind,t} - TCu_{agr,urb,ind,t}}{(1+r_u)^t} \right) L.X \right) \tag{۱}$$

در رابطه (۱)، TBu به عنوان منافع مرتبط با مصرف آب و TCu به عنوان هزینه‌های کل حاصل از تحویل آب به مصرف‌کنندگان مختلف می‌باشد. در پایان، مدل اقتصادی در این مطالعه با استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی[1] حل و الگوی کشت بهینه هر منطقه استخراج شده است.

محدودیت هیدرولوژیکی سطح حوضه نشان می‌دهد که میزان آب مصرفی محصولات (c) با تکنولوژی‌های آبیاری مختلف (تغییر از آبیاری سطحی به آبیاری بارانی و قطره‌ای و ضریب اثرگذار بر عملکرد) (k) در هر منطقه (j) کمتر از حجم میزان آب در دسترس مناطق مختلف می‌باشد.

$$\sum_{c,k} nw_{p_c,j,k}.Area_{V_c,j,k} \le aw_{p_j}.Land_{p_j} \tag{۲}$$

در این رابطه، $nw_{p_c,j,k}$ نیاز آبی محصولات با تکنولوژی آبیاری متفاوت در مناطق مختلف $Area_{V_c,j,k}$ متغیر تصمیم مدل و بیانگر میزان سطح زیر کشت هر محصول با تکنولوژی آبیاری متفاوت در مناطق مختلف حوضه، aw_{p_j} میزان آب در دسترس مناطق مختلف به ازای یک واحد سطح زیر کشت (زمین در دسترس) و $Land_{p_j}$ میزان سطح زیرکشت (زمین در دسترس) مناطق مختلف است که پارامترهای این رابطه شامل $nw_{p_c,j,k}$ (نیاز آبی محصولات) و aw_{p_j} (میزان آب در دسترس مناطق) از مدل شبیه‌سازی WEAP برای افق ۲۰۴۰ استخراج شده‌اند.

براساس قاعده توازن آب، جریان عرضه آب $W_{p_v,t}$ (جریان‌های سطحی ورودی به حوضه، گره‌های اشل‌های (دریچه‌های) اندازه‌گیری، برداشت آب سطحی، جریان‌های برگشتی و خروجی‌های مخزن) به عنوان محدویت عرضه آب برابر با میزان آب برداشت ($X_{p_divert,t}$) به عنوان محدودیت میزان آب برداشت شده در نظر گرفته شده است.

$$W_{p_v,t} = X_{p_divert,t} \tag{۳}$$

آب در محدوده مطالعاتی می‌تواند به دو شیوه برداشت سطحی از جریان رودخانه و پمپاژ به مصرف تبدیل شود. مجموع کل آب برداشت شده در این حالت عبارت است از:

$$X_{p_divert\ agri,t} = \sum_{divert} \alpha_{divert,agri} X_{p_divert,t} + \sum_{pump} \alpha_{pump,agri} X_{p_pump,t} \tag{۴}$$

پارامتر α عبارت از ماتریس واحدی است که گره‌های مشخص شده با زیرنویس خود را به یکدیگر متصل می‌کند. از طرف دیگر، بخشی از آب برداشتی، مورد مصرف قرار گرفته (use)، بخشی دیگر به زمین نفوذ کرده (seepage) و مابقی به صورت جریان برگشتی (return) به رودخانه باز می‌گردد (۱۰).

$$X_{p_agri,t} = \sum_{use} \alpha_{use,agri} X_{p_use,t} + \sum_{seepage} \alpha_{seepage,apply} X_{p_seepage,t} + \sum_{return} \alpha_{return,apply} X_{p_return,t} \tag{۵}$$

سدها و سفره‌های آب زیرزمینی، به عنوان دو منبع بالقوه ذخیره آب هستند. ذخیره سالانه آب سدها (Z_{p_vt})، وابسته به پارامترهایی شامل ذخیره سال قبل ($Z_{p_v,t-1}$)، تبخیر از سطح منبع ($X_{p_e,t}$) و خالص خروجی از مخزن ($X_{p_l,t}$) می‌باشد (۱۰). ذخیره سالانه مخزن را می‌توان به صورت رابطه زیر ارایه نمود.

$$Z_{p_v,t} = Z_{p_v,t-1} - \sum_{e} \alpha_{el} X_{p_e.t} - \sum_{l} \alpha_{l,r} X_{p_l,t} \tag{۶}$$

1- None Leaner Programing (NLP)

محدودیت منابع ذخیره آب سطح حوضه نشان می‌دهد که ذخیره سالانه vامین مخزن در دوره t ($Z_{p_v,t}$) نباید از ظرفیت مخزن در دوره t ($K_{p_v,t}$) تجاوز نماید.

$$Z_{p_v,t} \le K_{p_v,t} \qquad (۷)$$

محدودیت زمین سطح حوضه نشان می‌دهد که مجموع سطح زیر کشت محصولات با تکنولوژی‌های آبیاری مختلف در هر منطقه کمتر از میزان زمین در دسترس هر منطقه می‌باشد.

$$\sum_{c,k} Area_{V_c,j,k} \le land_{p_j} \qquad (۸)$$

همچنین در این مدل میزان آب در دسترس زیرحوضه‌های مختلف، عملکرد و نیاز آبی محصولات شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل WEAP برای افق ۲۰۴۰ ورودی‌های مدل اقتصادی می‌باشند.

مدل SWAT جهت شبیه‌سازی اثرات جانبی آلودگی مصرف آب و اعمال محدودیت زیست‌محیطی

مدل SWAT یک مدل کامل در مقیاس سطح حوضه است که به وسیله‌ی سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا برای شبیه‌سازی جریان، رسوب، عناصر غذایی و بیلان مواد شیمیایی در حوضه‌هایی با خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی متفاوت برای دوره‌های زمانی طولانی در آینده، ارائه شده است. ورودی مدل SWAT شامل اطلاعات هیدرولوژیکی، شرایط اقلیمی، نوع خاک، رشد گیاه، مدیریت کشاورزی و پویای آفت‌کش‌ها، مدیریت اراضی و روندیابی جریان می‌باشد. مدل SWAT فعلی برگرفته از مطالعات گاسمن و همکاران (۸) و ویلیامز و همکاران (۴۱) بوده که شامل مولفه‌های کلیدی از مدل‌های USDA-ARS و همچنین سایر مدل‌ها است. مرکز اصلی مدل‌های حمل آفت‌کش، هیدرولوژی و رشد محصول که در مدل SWAT آورده شده است می‌تواند در مدل‌های مقیاس دشت USDA-ARS از جمله مدل اثرات بارگذاری آب زیرزمینی، سیستم‌های مدیریت کشاورزی (۱۵) (GLEAMS)، رواناب و فرسایش از مدل سیستم مدیریت کشاورزی (۲۹) (CREAMS)، مواد شیمیایی و مدل گاسمن (۸) (EPIC) ردیابی شود. مدل SWAT اولیه با استفاده از اتصال SWRRB با ساختار مسیریابی در مدل ROTO ایجاد شده است (۴). در این مدل، قابلیت‌های مسیریابی گسترده و انتقال آلاینده‌ها، جریان مسیریابی رسوب و جریان جنبشی از مدل QUAL2E گنجانده شده است (۸). در نسخه‌های بعدی از این مدل، سیکل اصلاح شده‌ی کربن براساس مدل (۱۳) (CFARM)، بررسی زمانی شیوه‌های مدیریتی و تغییرات کاربری اراضی و افزایش زهکشی زیرسطحی، نوارهای حائل، راه‌های آبی، آبیاری و دیگر روش‌های بهبود حفاظت و مدیریت (۴) افزوده شده است.

در مدل SWAT یک حوضه به چندین زیرحوضه تقسیم می‌شود و سپس هر زیرحوضه به تعدادی واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) جزءبندی می‌گردد و جزئیات مکانی را که متشکل از پوشش اراضی، ویژگی‌های خاک، چرخه‌ی مواد مغذی، و شیب همگن می‌باشد، شبیه‌سازی می‌کند (۴). بخش‌های اصلی مدل شامل هیدرولوژی، اقلیم، واحدهای واکنش هیدرولوژیک، تالاب یا اراضی مرطوب، آب زیرزمینی، فرسایش، رشد گیاهان، چرخه عناصر غذایی، آفت‌کش‌ها، مدیریت اراضی و روندیابی جریان می‌باشد (۸).

اتصال مدل بیوفیزیکی SWAT با مدل بهینه اقتصادی در این مطالعه بدین صورت است که نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی مدل SWAT در مدل اقتصادی سطح حوضه به‌کار برده می‌شود. مقادیر آبشویی نیترات و فسفات شبیه‌سازی شده از مدل SWAT برای محصولات مختلف در سطح حوضه در استراتژی‌های مدیریتی مختلف به‌عنوان مولفه‌ی اصلی به‌دست آمده از این مدل شناخته می‌شود که با استفاده از این مقادیرتابع هدف هزینه اثرات جانبی آلودگی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min imise\, TCL_{a,g,r,t} = \sum_{f} \sum_{k} pem_{agr,f,k,t} \times em_{applyagr,c,k,t} \qquad (۹)$$

که در رابطه فوق، هدف حداقل‌سازی هزینه‌های اثرات جانبی تلفات نیترات در گره‌های مصرف آب کشاورزی است. pem و em به ترتیب بیانگر هزینه و میزان تلفات نیترات به ازای کشت هر هکتار از محصولات مختلف (c)، با تکنولوژی‌های آبیاری متفاوت (k)، در زمان‌های مورد بررسی (t) و در گره‌های مصرف آب کشاورزی است که از نتایج شبیه‌سازی مدل SWAT استخراج شده است.

$$NPV = \left(\sum_{u} \sum_{t} \left(\frac{TB_{p_agri,t} - AC_{p_agri,t}}{(1+r)^{t}} \right) . Area_{V,c,j,k} \right) - \left(\sum_{u} \sum_{t} \left(\frac{pem_{p_agri,c,k,t} . em_{p_agri,c,k,t}}{(1+r)^{t}} \right) . Area_{V,c,j,k} \right) \qquad (۱۰)$$

مدل بهره‌برداری تلفیقی کمی-کیفی تخصیص آب و آلودگی در سطح محدوده مطالعاتی بدین منظور تدوین گردید که بتوان با استفاده از آن تأمین نیازهای کمی-کیفی را در محدوده مطالعاتی در یک افق زمانی بلندمدت بهینه نمود. این مدل تحت تاثیر مقدار نیازهای آبی بخش‌های مختلف مصرف‌کننده، آب قابل عرضه، تخصیص آب و قیود کیفی مربوط به مقدار آلودگی تخلیه شده قرار دارد.

لازم به ذکر است که تمامی محدودیت‌های منظور شده در مدل اقتصادی به همراه محدودیت‌های هیدرولوژیکی در مدل تعمیم‌یافته اقتصادی-زیستی نیز در نظر گرفته خواهد شد و یک محدودیت اضافی که بیانگر حد مجاز میزان نیترات آزاد شده (MN) است، نیز به مدل اضافه می‌شود.

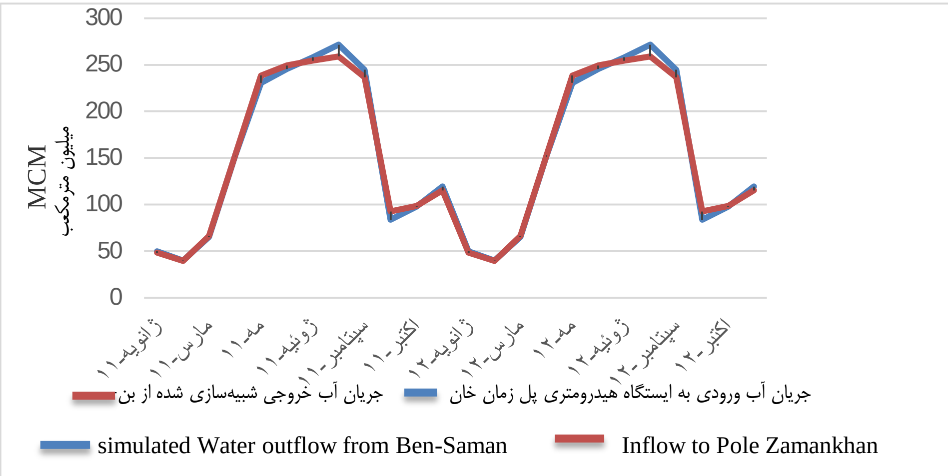
$$em_{p_agr,c,k,t} \times Area_{V_c,k,t} \le MN_{p_agr,c,k,t} \qquad (۱۱)$$

تمامی محاسبات و تخمین‌های عددی مدل‌های ذکر شده در نرم‌افزار GAMS انجام شده است. همچنین داده‌های اقتصادی نظیر میزان سطح زیرکشت محصولات، قیمت محصولات، ارزش آب کشاورزی، عملکرد محصولات (گندم، جو، یونجه، آفتابگردان، سیب‌زمینی و ...)، هزینه تولید در واحد سطح، هزینه آب در واحد سطح و داده‌های هیدرولوژیکی شامل جریان‌های ورودی و خروجی آب (جریان‌های ورودی به رودخانه، میزان برداشت از رودخانه، دبی آب در ایستگاه‌های هیدرومتری، ضرایب جریان آب در واحدهای هیدرولوژیکی)، ذخیره منابع آب (ذخیره آب سد، میزان آزادسازی سد و تخلیه آب زیرزمینی)، موقعیت جغرافیایی گره‌های مختلف ورودی و خروجی آب، نیاز آبی محصولات (نیاز خالص آبی و راندمان آبیاری به تفکیک روش آبیاری مورد استفاده) از سازمان کشاورزی استان اصفهان و شرکت مدیریت منابع آب ایران و آب منطقه‌ای جمع‌آوری شده است. داده‌های شرایط اقلیمی و اطلاعات لازم در زمینه‌ی خاک، نوع آبیاری و رشد گیاه و غیره نیز از اسناد شرکت‌های تحقیقاتی منابع آب و خاک در سطح حوضه طی سال آماری ۹۱-۱۳۹۰ جمع‌آوری شده است.

نتایج و بحث

ارزیابی اعتبارسنجی شبیه‌سازی

جهت ارزیابی اعتبار سنجی شبیه‌سازی صورت گرفته در نرم افزار WEAP از ابزاری به نام PEST بهره گرفته شد. در مطالعه حاضر جهت ارزیابی اعتبارسنجی شبیه‌سازی و کالیبراسیون مدل از داده‌های مشاهداتی ماهانه حجم جریان آب ورودی به ایستگاه هیدرومتری پل زمان خان طی سال‌های ۲۰۱۲و ۲۰۱۱ (داده‌های مشاهداتی موجود) و مقایسه آن با خروجی جریان آب شبیه‌سازی شده از بن-سامان (محدوده مطالعاتی-واحد هیدرولوژیک) واقع قبل از ایستگاه هیدرومتری بهره گرفته شد.



شکل ۲- مقایسه داده‌های مشاهداتی حجم جریان رودخانه با داده‌های شبیه‌سازی

Figure 2- Comparison of observational data of river flow volume with simulation data

مقایسه حجم جریان آب خروجی شبیه سازی شده از زیرحوضه بن-سامان با داده‌های مشاهداتی حجم جریان آب ورودی به ایستگاه هیدرومتری پل زمان خان طی سال‌های ۲۰۱۲ و۲۰۱۱ (سال داده‌های هیدرولوژیکی مشاهداتی موجود) نشان می‌دهد که کالیبراسیون مدل با دقت بالایی صورت گرفته است چراکه تقریباً روند جریان خروجی شبیه‌سازی شده از اراضی بالا دست ایستگاه هیدرومتری با روند مشاهدات واقعی جریان ورودی به ایستگاه هیدرومتری پل زمان خان منطبق می‌باشد (شکل ۲).

در ادامه نتایج شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه رودخانه زاینده‌رود در شرایط پایه و سناریوی تغییر اقلیم A2 و همچنین سیاست حفاظت از منابع آب زیرزمینی و اعمال محدودیت مصرف آب زیرزمینی (s1) برای متغیر میزان آب عرضه شده (آب در دسترس) مناطق مختلف حوضه زاینده‌رود برای دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۱ (افق ۲۰۴۰) ارائه شده است. همچنین در ادامه به تحلیل اثرات سیاست‌های متختلف مدیریت منابع آب (محدودیت مصارف آب زیرزمینی (از طریق اعمال محدودیت بر مصرف آب چاهها و اخذ مجوز احداث چاه‌های آب (s1)، ترکیب سیاست‌های حفاظتی محدودیت مصارف آب زیرزمینی همراه با تغییر تکنولوژی آبیاری (تغییر از آبیاری سطحی (راندمان ۴۰ درصد) به آبیاری بارانی (راندمان ۷۰ درصد) و قطره‌ای (راندمان ۹۰ درصد)) (s1+s2)، ترکیب سیاست‌های حفاظتی محدودیت مصارف

آب زیرزمینی همراه با تغییر تکنولوژی آبیاری و افزایش قیمت آب (به میزان دو برابر) (s1+s2+s3) با و بدون تغییر اقلیم) بر الگوی کشت بهینه و وضعیت اقتصادی (معیشتی) کشاورزان پرداخته شده است. لازم به ذکر است که در مدل برنامه‌ریزی برای هر منطقه و هر محصول در شرایط پایه، تکنولوژی آبیاری مشخص شده است (به طور مثال در محدوده بن–سامان درصدی از زمین‌ها به صورت سطحی و درصدی دیگر به صورت قطره‌ای آبیاری می‌شوند). در حالیکه در شرایط بهبود تکنولوژی این دستور به مدل برنامه‌ریزی داده شده است که برای هر محصول در هر منطقه تکنولوژی آبیاری مشخص شده است (به طور مثال برای همه محصولات به استثنای برنج، آبیاری به صورت قطره‌ای مشخص شده است).

جدول ۱- اثر سناریوی تغییر اقلیم A2 با اعمال سیاست حفاظتی محدودیت مصرف منابع آب زیرزمینی بر میزان آب در دسترس مناطق مختلف طی دوره‌ی ۲۰۱۱-۲۰۳۹

Table 1- The effect of A2 climate change scenario by applying the protection policy of limiting the consumption of groundwater resources on the amount of water available in different areas during the period 2011-2039

محدوده مطالعاتی Case study	(p) (m³)	p+A2+s1 (m3)
نجف‌آباد (Najafabad)	16508	13520
مهیار شمالی (North Mahyar)	11945	10551
لنجانات (Lenjanat)	11730	9510
کوهپایه–سگزی (Koohpayeh-Segzi)	13630	11837
اصفهان–برخوار (Esfahan-Borkhar)	15335	13111
بن–سامان (Ben-saman)	11842	9711

مأخذ: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

نتایج جدول فوق بیانگر آن است که تغییر اقلیم باعث کاهش میزان آب در دسترس تمامی زیرحوضه‌ها خواهد شد. از یافته‌های مطالعات مختلف می‌توان دریافت که بکارگیری سیاست‌ها و استراتژی‌هایی در زمینه مدیریت منابع آب نیاز است که مورد پذیرش کشاورزان قرار بگیرد (۱۷، ۴۲ و ۱۲).

جدول ۲- تخصیص آبی بین بخش‌های مختلف مصرف‌کننده در حوضه آبریز زاینده‌رود

Table 2- Water allocation between different consumer sectors in Zayandehrood Basin

بخش‌های مصرف‌کننده User	مصرف فعلی Current use (MCM)	مصرف بهینه Optimal use (MCM)
شرب (Urban)	334	321
کشاورزی (Agriculture)	3615	2509
صنعت (Industry)	152	104
کل بخش‌ها (Total)	4101	2934

مأخذ: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

نتایج جدول فوق نشان می‌دهد که مصرف فعلی آب تمامی بخش‌ها در سال پایه بیش از میزان آب بهینه تخصیص داده شده از طریق مدل است. این بدین مفهوم است که می‌توان با تخصیص بهینه آب بین بخش‌های مختلف، حجم مصرف آب را به ویژه در بخش‌های صنعت و کشاورزی تا حد بسیار زیادی کاهش داد. همچنین نتایج ارزیابی اثرات سیاست‌های حفاظت از منابع آب بر معیشت کشاورزان در سطح حوضه زاینده‌رود نشان داد که با تخصیص بهینه آب بین بخش‌های مختلف کشاورزی، شرب و صنعت می‌توان حدود ۲۸ درصد از حجم آب مصرفی کل حوضه را کاهش داد. نتایج مطالعات نیکویی و همکاران (۲۴)، وارد (۳۹) و گوهر و همکاران (۹) برای حوضه‌های آبریز مختلف نیز در جهت اثبات همین موضوع بوده است.

جدول ۳- اثر تغییر اقلیم و اعمال سیاست‌های حفاظت از منابع آب بر بازده برنامه‌ای کشاورزان (میلیون ریال در هکتار)

Table 3- The effect of climate change and the implementation of water conservation policies on farmers' program yields (million rials per hectare)

محدوده مطالعاتی Case study	p	A2+s1	A2+s1+s2	A2+s1+s2+s3
نجف‌آباد (Najafabad)	73	68(-%7)	68(-%7)	59(-%19)
مهیار شمالی (North Mahyar)	22	19(-%14)	36(-%64)	27(+%23)
لنجانات (Lenjanat)	49	45(-%8)	45(-%8)	35(-%29)
کوهپایه-سگزی (Koohpayeh-Segzi)	58	58(0)	61(+%5)	53(-%9)
اصفهان-برخوار (Esfahan-Borkhar)	71	68(-%4)	77(+%8)	66(-%7)
بن-سامان (Ben-saman)	82	78(-%5)	78(-%5)	71(-%13)
مجموع کل حوضه (Total basin)	62	59(-%5)	62(0)	53(-%15)

مأخذ: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

جدول ۴- اثر تغییر اقلیم و اعمال سیاست‌های حفاظت از منابع آب بر کارایی اقتصادی مصرف آب (ریال بر مترمکعب)

Table 4- Effect of Climate Change and Application of Water Resources Protection Policies on Economic Efficiency of Water Consumption (Rials per m^3)

محدوده مطالعاتی Case study	p	A2+s1	A2+s1+s2	A2+s1+s2+s3
نجف‌آباد (Najafabad)	7529	7010	7010	6120
مهیار شمالی (North Mahyar)	1461	1307	4090	3090
لنجانات (Lenjanat)	4199	4728	4728	3273
کوهپایه-سگزی (Koohpayeh-Segzi)	4600	4922	5261	6425
اصفهان-برخوار (Esfahan-Borkhar)	5567	5186	7516	7117
بن-سامان (Ben-saman)	11391	10495	10495	9495
مجموع کل حوضه (Total basin)	5209	5283	6002	5901

مأخذ: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

نتایج ارایه شده در جدول ۳ نشان داد که اعمال سیاست تغییر تکنولوژی آبیاری به سمت تکنولوژی‌های مدرن در ترکیب با سیاست محدودیت مصرف منابع آب زیرزمینی جهت تعادل بخشی به سفره‌های آب زیرزمینی می‌تواند اثرات تغییر اقلیم بر بازده برنامه‌ای کشاورزان را تعدیل و منفعت (سود) آن‌ها را بهبود بخشد. از طرف دیگر، اعمال این سیاست باعث افزایش کارایی اقتصادی مصرف آب می‌شود. حال آن که اعمال سیاست افزایش قیمت آب علی رغم کاهش مصرف منابع آب نمی‌تواند بهبود منفعت کشاورزان و کارایی اقتصادی آب را تحقق بخشد. بنابراین، اثبات بهبود منفعت کشاورزان با اعمال سیاست‌های ترکیبی حفاظت از منابع آب می‌تواند نقش موثری در تشویق کشاورزان به پذیرش این سیاست‌ها، عملیاتی شدن مدیریت بهینه منابع آب و حل تضاد بین مصارف آب در حوضه ایفا کند. تأثیر مثبت برخی از سیاست‌ها بر بهبود وضعیت منفعت کشاورزان در مطالعات دیگری نیز به اثبات رسیده است (۳۴، ۳۸ و ۶).

شبیه‌سازی اثرات جانبی آلودگی (میزان تلفات نیترات)

در مطالعه‌ی حاضر با استفاده از مدل SWAT، حوضه آبریز زاینده رود به ۲۸ زیر حوضه تقسیم شد. سپس این مدل براساس داده‌های مشاهده‌ای میزان تلفات نیترات ماهانه و از طریق الگوریتم SUF12 در نرم افزار SAWT-CUP واسنجی (در دوره‌ی آماری ۱۳۷۲ تا ۱۳۸۰) و اعتبارسنجی (در دوره‌ی آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۲) شد که برای این منظور از دو آماره‌ی ضریب تبیین و نش-ساتکلیف استفاده گردید که در مطالعات (۳۰ و ۲) مورد استفاده قرار گرفته‌اند (جدول ۴). نتایج به دست آمده از آماره‌های ضریب تبیین و نش-ساتکلیف برای واسنجی مقادیر میزان بار نیترات در ایستگاه اندازه‌گیری کیفیت آب ورزنه به‌ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۷۰ و برای اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۶۵ به دست آمد که با توجه به گزارش موریاسی و همکاران (۲۰)، بیانگر این است که واسنجی و اعتبارسنجی مدل مورد تأیید می‌باشد. این یافته نشان دهنده‌ی توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی اثرات جانبی آلودگی مصرف آب (میزان تلفات نیترات) در طی دوره‌ی شبیه‌سازی است.

جدول ۵- نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی میزان تلفات نیترات در ایستگاه ورزنه
Table 5- Results of calibration and validation of nitrate losses in Varzaneh station

آزمون (Test)	ضریب تعیین (R^2)	نش-ساتکلیف (NS)
واسنجی (Najafabad)	0.72	0.70
اعتبارسنجی (North Mahyar)	0.68	0.65

مأخذ: یافته‌های تحقیق
Source: Research findings

الگوی کشت بهینه اقتصادی-زیستی

به منظور تعیین الگوی کشت بهینه در شرایط اعمال محدودیت زیست‌محیطی به مدل اقتصادی (مدل اقتصادی-زیستی)، ابتدا با استفاده از مدل SWAT، میزان نیترات به تفکیک محصولات مختلف در سطح حوضه شبیه‌سازی گردید. سپس مدل چندهدفه با اهداف حداکثرسازی بازده برنامه‌ای و حداقل‌سازی هزینه تلفات نیترات برنامه‌ریزی و حل شد. همچنین محدودیت حد مجاز میزان تلفات نیترات به تفکیک مناطق در مدل اضافه گردید برای پارامتر حداکثر میزان مجاز تلفات نیترات در داخل کشور استاندارد مشخصی تعریف نشده است، به همین دلیل این میزان با توجه به مطالعه‌ی زیو و همکاران (۴۶) معادل ۳۸ کیلوگرم در هکتار تعریف گردید نتایج حاصل از مدل اقتصادی با درونی‌سازی اثرات جانبی آلودگی مصرف آب (میزان تلفات نیترات) و الگوی کشت بهینه اقتصادی-زیستی استخراج و با الگوهای کشت فعلی و بهینه اقتصادی بدون درونی‌سازی اثرات جانبی آلودگی مقایسه شد که نتایج به تفکیک هر الگو در جدول ۶ و شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ۶- سطح زیرکشت کل محصولات، هزینه تلفات نیترات و بازده برنامه‌ای در الگوی بهینه اقتصادی (O1) و اقتصادی-زیستی (O2)
Table 6- Total crop erea, Cost of Nitrate losses and Cross margin in economic optimal pattern and bio-economic

محدوده مطالعاتی Case study	الگوی کشت Crroping Pattern	مجموع سطح زیرکشت (هکتار) Total crop area (ha.)	هزینه تلفات نیترات در هکتار (میلیون ریال) Cost of nitrate losses	بازده برنامه‌ای در هکتار (میلیون ریال) Gross Margin (million Irr)
نجف‌آباد(Najafabad)	O1	46634	33	73
	O2	46634	28	65
مهیار شمالی (North Mahyar)	O1	7489	32	22
	O2	5277	34	28
لنجانات (Lenjanat)	O1	38449	26	49
	O2	38449	26	49
کوهپایه-سگزی (Koohpayeh-Segzi)	O1	74130	33	58
	O2	74130	27	55
اصفهان-برخوار(Esfahan-Borkhar)	O1	43634	27	71
	O2	43634	27	71
بن-سامان (Ben-saman)	O1	2718	32	82
	O2	2532	30	80
مجموع کل حوضه (Total basin)	O1	213051	30	61
	O2	210656	28	58

مأخذ: یافته‌های تحقیق
Source: Research findings

نتایج حاصل از استخراج الگوی کشت به تفکیک زیرحوضه‌های مطالعاتی نشان داد که اعمال الگوی کشت بهینه با هدف حداکثرسازی بازده برنامه‌ای کشاورزان و محدودیت‌های هیدرولوژیکی شبیه‌سازی شده (الگوی کشت بهینه اقتصادی (S1)) سطح زیرکشت محصولات پربازده در محدوده‌های مطالعاتی افزایش خواهد داد. بنابراین تصور بر این است که چنین الگویی افزایش مصرف آب را در پی داشته باشد که نتایج مطالعه چنین فرضیه‌ای را اثبات نمی‌کند. چرا که در الگوی کشت بهینه اقتصادی سهم استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری در فرایند تولید افزایش یافته است. اما اعمال چنین الگویی منجر به افزایش هزینه تلفات در تمامی محدوده‌های مطالعاتی گردیده است (شکل ۳، بعلت رعایت اختصار از ارایه شکل‌های سایر زیرحوضه‌ها اجتناب شده است). همچنین مطابق جدول ۶ با اعمال

الگوی کشت بهینه اقتصادی (O1) در محدوده مطالعـاتی نجـف‌آبـاد، مهیار شمالی، لنجانات، کوهپایه-سگزی و اصفهان-برخوار به ترتیـب به طور متوسط به ازای افـزایش ۲٫۳۳، ۰٫۵، ۱۵، ۲٫۵۷ و ۷٫۵ میلیـون ریال در هر هکتار هزینه تلفات نیترات در این مناطق ۱ میلیون ریـال افزایش خواهد یافت. نتایج مدل اقتصادی بدون توجه بـه محـدودیت میزان تلفات نیترات، اثرات مخربی بر محیط‌زیسـت در ایـن محـدوده مطالعاتی دارد. لذا استخراج الگـوی بهینـه کـه ضـمن تـأمین هـدف اقتصادی با توجه به شـرایط هیـدرولوژیکی، شـرایط زیسـت‌محیطـی محدوده‌های مطالعاتی را نیز مدنظر قـرار دهـد، الزامـی اسـت. نتـایج حاصل از استخراج الگوی کشت اقتصادی-زیستی (O2) نشان داد که بهبود وضعیت معیشتی کشاورزان در منطقه نجف آباد با توجـه بـه در نظر گـرفتن شـرایط هیـدرولوژیکی (O1) و شـرایط هیـدرولوژیکی و اثرات جانبی (O2) به ترتیب حدود ۱۴ و ۶، در منطقه مهیار شـمالی ۵ و ۱۱، در منطقه لنجانات ۵ و ۱۱، در منطقه کوهپایه-سگزی ۱۸ و ۱۵ و در منطقه بن-سامان ۲۰ و ۱۸ میلیون ریال در هکتـار بـرآورد شـده است. در دو منطقه لنجانات و اصفهان-برخوار مسئله‌ی اثـرات جـانبی آلودگی‌های زیست محیطی تولید محصـولات چنـدان دارای اهمیـت نمی‌باشد و در این دو منطقه مذکور، الگوی کشـت بهینـه اقتصـادی-زیستی و اقتصادی مشابه یکدیگر است. تفاوت در نتـایج بـه تفکیـک محدوده‌های مطالعاتی مختلف در یک حوضه وابستگی مدیریت منابع آب به شرایط مکانی و زمانی را به اثبات می‌رساند که این ماهیـت در مطالعات مختلف نیز به اثبات رسیده است (۶ و ۲۶).



شکل ۳- الگوی کشت بهینه و سهم استفاده از تکنولوژی‌های نوین آبیاری در محدوده‌های مطالعاتی

Figure 3- Optimal Cropping pattern and modern irrigation technology in the cases study

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

حوضه آبریز زاینده‌رود یکی از حوضه‌های مهم کشور است که بـا چالش کمبود کمّی و کیفی آب روبرو می‌باشد. هدف اصلی مطالعـه‌ی حاضر مدیریت کمّی و کیفی منـابع آب و ارزیـابی پیامـدهای درونـی سازی اثرات جانبی آلودگی مصرف آب بـر ایـن نـوع مـدیریت اسـت. نتایج ارزیابی اثرات سیاسـت‌هـای حفاظت از منـابع آب بـر معیشـت کشاورزان در سطح حوضه زاینـده‌رود هماننـد نتـایج دیگـر مطالعـات (نیکـویی و همکـاران) و همچنـین مطالعـه حاضـر نشـان داد کـه بـا تخصیص بهینه آب بین بخش‌های مختلف مصرف‌کننـده، حجـم آب مصرفی کل حوضه کاهش یافت. اما در هیچ یکی از مطالعات گذشـته اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت هیدرلوژیکی و اقتصادی و همچنین تأثیر

سیاست‌ها بر تعدیل اثرات زیان‌بار تغییر اقلیم بر معیشت کشاورزان در سطح حوضه ارزیابی نشده است (۲۴) که برای دستیابی به این مهم در مطالعه‌ی حاضر از ابزار WEAP برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی سطح حوضه و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بهره گرفته شده است. همچنین نتایج ارزیابی سیاست‌های حفاظت از منابع آبی در سطح حوضه زاینده‌رود نشان داد که می‌توان سیاست مناسب با هر منطقه را شناسایی و بکار بست. تفاوت در نتایج به تفکیک محدوده‌های مطالعاتی مختلف در یک حوضه وابستگی مدیریت منابع آب به شرایط مکانی و زمانی را به اثبات می‌رساند که این ماهیت در مطالعات مختلف نیز به اثبات رسیده است (Westerhoff & Smit, 2008; Reidsma et al., 2010; Esteve et al., 2015). همچنین مقایسه نتایج مدل اقتصادی با مدل چندهدفه اقتصادی-زیستی نشان داد که در نظر گرفتن اثرات جانبی آلودگی بر الگوی بهینه که به حداکثرسازی بازده برنامه‌ای کشاورزان با توجه به منابع آبی مناطق مختلف می‌پردازد، در برخی از مناطق تأثیرگذار و در برخی دیگر بدون تأثیر است. به بیان دیگر، مقایسه نتایج نشان داد که الگوی بهینه اقتصادی-زیستی می‌تواند یک الگوی کارآمد برای مدیریت کمّی و کیفی منابع آب در سطح حوضه آبریز زاینده‌رود تلقی شود. نتایج مطالعه‌ی حاضر در مطالعات شوشتریان و همکاران (۲۷) و شیخ زین‌الدین و همکاران (۲۶) نیز به اثبات رسیده و در این مطالعات نیز نقش مهم اثرات جانبی آلودگی از جمله میزان تلفات نیترات در بررسی مدیریت پایدار تأیید شده است. لذا توصیه می‌گردد که در مطالعات آینده با توجه به نقش موثر سیاست‌های مختلف در زمینه کیفیت منابع آب، اثرات سناریوهای مختلف تغییرات اقلیم، خشکسالی، افزایش جمعیت و ... مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد.

منابع

1- Akbari F., Taheri Borojeni G., Moridi A and Khazaei pool A. 2018. Investigating the effect of climate change on runoff the Aras River basin using the model SWAT. Journal of Environmental Science and Technology 16: 75-91. (In Persian)

2- Akhavan S.J., Abedi-Koupai S.F., Mousavi M., Afyuni S.S., Eslamian and Abbaspour K.C. 2010. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar watershed, Iran. Journal Agriculture Ecosystem and Environment 139(4): 675- 688.

3- Amini A., Javan M., Eghbalzadeh A., and Ghasemi M.R. 2016. Evaluation of water resources management in Gamasiab basin of Kermanshah province using model WEAP. Journal of Water Resources Engineering 10: 13-18. (In Persian)

4- Arnold J.G., Allen P.M., Volk M., Williams J.R., and Bosch D.D. 2010a. Assessment of different representations of spatial variability on SWAT model performance. Trans. ASABE 53(5): 1433-1443.

5- Bagheri rahdaneh M.R., Ghaemi Z., and Khajehzadeh A. 2018. The first conference of Soil and Water Management Tool (SWAT) in the management of water resources, Isfahan, Isfahan University of Technology.

6- Esteve P., Varela-Ortega C., Blanco-Gutierrez I., and Downing T.E. 2015. A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. Ecological Economics 120: 49-58.

7- Eliasson J., 2015. The rising pressure of global water shortages. Nature 517 (7532), 6.

8- Gassman P.W., Reyes M., Green C.H., and Arnold J.G. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future directions. Trans. ASABE 50(4): 1211- 1250.

9- Gohar A.A., Amer S.A., and Ward F.A. 2015. Irrigation infrastructure and water appropriation rules for food security. Journal of Hydrology 520: 85-100.

10- Han Y., Huang Y.F., Wang G.Q., and Maqsood I. 2011. A multi-objective linear programming model with interval parameters for water resources allocation in Dalian city. Water Resource Management 25: 449–463.

11- Iran Water Resource Management Company. 2016. Reports of integrated water resource management of the zayandehroud basin.

12- Kalbali E., Ziaee S., Mardani Najafabadi M., and Zakerinia M. Approaches to adapting to impacts of climate change in northern Iran: The application of a Hydrogy-Economics model Journal of Cleaner Production 280(1): 2020.

13- Kemanian A., Julich R.S., Manoranjan V.S., and Arnold J.G. 2011. Integrating soil carbon cycling with that of nitrogen and phosphorus in the watershed model SWAT: Theory and model testing. Ecol. Modelling 222(12): 1913-1921.

14- Knisel W.G., Foster G.R., and Leonard R.A. 1980. CREAMS: A system for evaluating management practice in Schaller. Agricultural Management and Water Quality. Lowa University Press. 178-199.

15- Leonard R.A., Knisel W.G., and Still D.A. 1987. GLEAMS: groundwater loading of agricultural management systems. Transactions of the ASAE 30(5):1403-1418.

16- Li J., He L., Chen Y.Z., Song X.S., and Lu H.W. 2017b. A believe l groundwater management model with minimization of stochastic health risks at the leader level and remediation cost at the follower level. Stoch.

Environ. Res. Risk Assess. 31(10): 2547–2571.
17- Mardani Najafabadi M., and Mirzaei A. 2019. Evaluating Effect of Policy Programs to Achieve Water Resources Stability Objective in Qazvin Plain. Agricultural Economics Research 11(43): 155-176. (In Persian)
18- Mardani Najafabadi M., Ziaee S., Nikouei A., and Ahmadpour Borazjani M. 2019. Mathematical programming model (MMP) for optimization of regional cropping patterns decisions. Agricultural Systems 173: 218-232.
19- Mimi Z., and Sawalhi B.I. 2003. A decision tool for allocating the waters of the Jordan River basin between all riparian parties. Water Resources Management 17: 447–461.
20- Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Binger R.L., Harmel R.D., and Veith T. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed.
21- Nasabian S., Mohammadi H., and Kikha A.R. 2014. The effect of modification of cropping pattern on reducing pollution of agricultural activities. Journal of Environmental Science and Technology 16: 75-91. (In Persian)
22- Narula K.K., and Gosain A.K. 2013. "Modeling hydrology, groundwater recharge and non-point nitrate loadings in the Himalayan Upper Yamuna basin". Science of the Total Environment 468–469 102–116.
23- Nikouei A., and Ward FA. 2013. Pricing irrigation water for drought adaptation in Iran. Journal of Hydrology 503:29-46.
24- Nikouei A., Zibaei M., and Ward FA. 2012. Incentives to adopt irrigation water saving measures for wetlands preservation, an integrated basin scale analysis. Journal of Hydrology 464-465, 216-232.
25- Pei Y., and Zhao Y. 2012. Risk evaluation of groundwater pollution by pesticides in China: a short review. Procardia Environmental Sciences 13: 1739–1747.
26- Reidsma P., Ewert F., Lansil A., and Leemans R. 2010. Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture. The importance of farm level responses. European Journal of Agronomy 32: 91-102.
27- Ranga Prabodanie R.A., Raffensperger J.F., Granr Read E., and Milke W. 2014. LP models for pricing diffuse nitrate discharge permits. Journal of Operational Research 220: 87-109
28- Regional Water Company of Isfahan. 2016. Available online at: http://www.esrw.ir/.site.
29- Rong Q., Cai Y., Chen B., Shen Z., Yang Z., Yue W., and Lin X. 2018. Field management of a drinking water reservoir basin based on the investigation of multiple agricultural nonpoint source pollution indicators in north China. Ecological Indicators 92: 113-123.
30- Salehi S., Chizari M., Sadighi H., and Bijani M. 2017. Assessment of agricultural groundwater users in Iran: a cultural environmental bias. Hydrogeology Journal 26(1): 285-295. (In Persian)
31- Sheikh Zeinodin A. 2016. Determining the management strategies of the agricultural system of the irrigation and drainage network of Dorodzan, biological economic approach. PhD Thesis in Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Shiraz University. (In Persian)
32- Shoushtarian A. 2018. Analysis of Agricultural and Environmental Economic Policies under the Abar Basin Basin Basin, an approach to agricultural sustainability. PhD Thesis in Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Shiraz University. (In Persian)
33- Smith M., Thomas Nichols E., Vidaurre D., Winkler A.M., Behrens T.E.J., Glasser M.F., Ugurbil K., Barch D.M., Van Essen D.V., and Miller K.L. 2015. A positive-negative mode of population covariation links brain connectivity, Demographics and Behavior 18: 1565-1567.
34- Tanaka S.K., Zhu T., Lund J.R., Howitt R.E., Jenkins M.W., Pulido M.A., Tauber M., Ritzema R.S., and Ferreira I.C. 2006. Climate warming and water management adaptation for California. Climate Change 76: 361-387.
35- Tuppad P., Douglas-Mankin K.R., Lee T., Srinivasan R., and Arnold J.G. 2011. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic/water quality model: Extended capability and wider adoption. Trans. ASABE 54(5): 1677-1684.
36- User guide for application water evalution and planning. 2017.
37- Van R.J., Veeren H.M., and Lorenz C.M. 2002. Integrated economic–ecological analysis and evaluation ofmanagement strategies on nutrient abatement in the Rhine basin .Journal of Environmental Management 66: 361–376.
38- Varela-Ortega C., Blanco-Gutiérrez I., Swartz C.H., and Downing TE. 2011. Balancing groundwater conservation and rural livelihoods under water and climate uncertainties an integrated hydro-economic modeling framework. Global Environmental Change 21(2): 604-619.
39- Ward F.A. 2014. Economic impacts on irrigated agriculture of water conservation programs in drought. Journal of Hydrology 508: 114-127.
40- Wang R., Fang L., and Kalin L. 2011. Modelling effects of land use/cover changes under limited data. Eco Hydrology 4: 265–276.
41- Williams J.R., Arnold J.G., Kiniry J.R., Gassman P.W., and Green C.H. 2008. History of model development at Temple, Texas. Hydrological Science Journal: 53(5): 948–960.
42- Yang L., Bai X., Zheng Khanna N., Yi S., Hu Y., Denga J., Gao H., Tuo L., Xianga SH., and Zhoub N. 2018. Water evaluation and planning (WEAP) model application for exploring the water deficit at catchment level in Beijing. Desalination and Water Treatment 118: 12–25.

43- Yates D., Sieber J., Purkey D., and Huber-Lee A. 2005. WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model,”model. Water International 30(4): 487-500.
44- Yazdanpanah T., Khodashenas, K., and Gahraman, B. 2008. Water Resource Management of basin by Weap (Case Study: Azgand basin). Agriculture Sience of Thecnology 22(1): 211-222. (In Persian)
45- Zeinodini S., Anoori S., and Zahmatkesh Z. 2018. Application of simulati optimization approache to assess the effect of climate and management scenarios on a water resource system. Iran-Wate Resources Research 14(5): 295-310. (In Persian)
46- Zu B., Saleh A., Jaynes D.B., and Arnold J.G. 2006. Evaluation of SWAT in simulating nitrate nitrogen and atrazine fates in a watershed with tiles and potholes. Trans. ASABE 49(4): 949-959.

Journal of Agricultural Economics and Development
Vol. 34, No. 3, Fall 2020, p. 341-356

نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی
جلد ۳۴، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹، ص. ۳۵۶-۳۴۱

Assessing the Consequences of Internalization of the Side Effects of Water Pollution on the Quantitative and Qualitative Management of Zayandehroud Basin

H. Kavand[1]- S. Ziaee[2*]- M. Mardani Najafabadi[2]
Received: 13-06-2020
Accepted: 16-11-2020

Introduction: The increase in water demand and the expansion of water pollution due to the development of agricultural, urban and industrial activities have led to a serious risk of water quality in many places. Therefore, its rational and logical management has become very difficult and complicated. In recent decades, concerns about water pollution from agricultural activities and its consequences have been growing. The existing regulations are not sufficient to limit the water pollution of the agricultural sector and to achieve the desired environmental consequences. Thus, economic tools have increasingly been proposed as an affordable way to limit pollution. Therefore, the side effects of water consumption in agriculture are vital issues for controlling and managing water pollution. The recent challenges in water resources of the Zayandehroud basin have led to the fact that this area has not been safe from water pollution and also the supply of high quality water is a major challenge in this basin. Therefore, providing a purposeful cropping pattern by reducing the side effects of water pollution caused by agricultural activities for the Zayandehroud basin can play an effective role in the quantitative and qualitative management of watershed resources.

Materials and Methods: In this study, the water resources management system of Zayandehroud basin has been modeled based on a multi-objective programming model. This model includes hydrological functions, land allocation, resource transfer and exploitation capacities, and the objective function is to maximize the net present value of the total benefits at the basin level. Also, the amount of water available in different sub-basins, the crop yield and net water requirements was simulated using the WEAP model for the 2040 horizon. This data was used as input in the economic model. In the next step, the side effects of water pollution are estimated and internalized in the economic model using permissible limit of water pollution in constraint and the cost of water pollution in the objective function. The mechanism designed to internalize the side effects of water pollution is simulated using the SWAT model and added to the integrated water management model of the basin as environmental constraint and c**ost of nitrate losses** in objective function. Therefore, by comparing the results of these two models, it is possible to evaluate the internalization of the side effects of water pollution on farmers' livelihoods and the cropping pattern in the basin.

Results and Discussion: Cropping pattern under basic conditions was applied in WEAP software for different regions. Yield and net water requirements of products were simulated using MABIA tools. The results were extracted by each region and then estimated at basin level. The results of the optimal cropping pattern after simulating the hydrological parameters of the basin showed that the gross margin compared to the current conditions for Najafabad, North Mahyar, Lenjanat, Kuhpayeh-Segzi, Isfahan-Borkhar and Ben-Saman regions was 14, 5, 15,18, 15 and 20 million Rials per hectare, respectively. The increase in the share of irrigation technologies in the economic model compared to the current model for Najafabad, Lenjanat, Kuhpayeh-Segzi, Isfahan-Borkhar and Ben-Saman regions was 40, 57, 35, 45 and 91 percent, respectively.Therefore, it can be expected that by changing the cropping pattern and also increasing the use of new irrigation systems, it is possible to improve the livelihood of farmers in the basin according to the current and future hydrological conditions. But these changes have increased the side effects of pollution on the basin. Therefore, it is necessary to provide a model that, in addition to improving the benefit, also reduces the cost of nitrate losses. The results of the optimal bioeconomic model indicate that with the application of this model, the rate of gross margin and the cost of nitrate losses have been obtained at 58 and 28 million Rials per hectare, respectively. Comparison of this model and the optimal economic model shows that farmers' gross margin and nitrate losses have decreased about 3 and 2 million Rials per hectare, respectively. Comparison of the current and optimal bioeconomic model also shows that while improving the gross margin by 12 million Rials, the rate of nitrate losses below the allowable

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor of Agricultural Economics, Univercity of Zabol, respectively.
(*- Corresponding Author Email: Samanziaee@uoz.ac.ir)
3- Assistant Professor of Agricultural Economics, Agricultural Engineering and Rural Development, Agriculture Sciences and Natural Resources University of Khuzestan

level in the basin can be realized.

Conclusion: Zayandehroud basin is one of the most important watersheds in the country, which is facing the challenge of quantitative and qualitative water shortages. The main purpose of this study is to quantitatively and qualitatively manage water resources and evaluate the consequences of internalizing the side effects of water pollution on this type of management. The results of the study showed that using the optimal economic cropping pattern will increase the farmers' gross margin and improve their livelihoods. Also, comparing the results of the economic model with the multi-objective bioeconomic model showed that considering the side effects of water resources pollution in some areas is effective and in others is ineffective. Therefore, it is recommended that in future studies, considering the effective role of different policies in the field of water resources quality, the effects of different scenarios of climate change, drought, population growth, etc. be examined and analyzed.

Keywords: Hydrological simulation, Integrated bioeconomic model, Optimal cropping pattern, Water pollution

پیوست:

مدل WEAP جهت شبیه‌سازی هیدرلوژیکی

مدل WEAP، یک ابزار برنامه‌ریزی منابع آب است که بر اصل توازن آب استوار می‌باشد و زیرحوضه‌های مختلف، گره‌های تقاضای آب، زیرساخت‌ها، جریان‌های آب و کانال‌های انتقال آب که همگی با یکدیگر مرتبط هستند را نشان می‌دهد (۳۶). این مدل یک معادله تعادل جرم آب، برای هر گره و اتصال در سیستم در گام‌های زمانی را حل می‌کند. آب برای تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان و میزان جریان پایین دست، بر اساس اولویت نیازها، برتری منبع، معادله تعادل جرم و سایر محدودیت‌ها، توزیع می‌شود. تقاضا آبی یک گره نیاز (SD)، به صورت مجموع تقاضاهای شاخه‌های پایه آن (BR) تعریف می‌شود. شاخه پایه، شاخه‌ای است که زیر آن شاخه‌ای وجود ندارد.

$$AD_{DS}=\sum_{Br}\left(TAL_{Br}\times WUR_{Br}\right) \tag{۱}$$

در معادله (۱)، AD تقاضای سالانه، TAL تراز فعالیت کل (فعالیت‌های کشاورزی، شهری و ...) و WUR نرخ استفاده آب (قیمت آب به ازای هر واحد فعالیت) است. تقاضای ماهانه، مقدار آب مورد نیاز گره برای استفاده خودش در هر ماه را نشان می‌دهد. در حالی که نیاز منبع، مقدار واقعی نیاز درخواست شده از منابع ذخیره است. نیاز منبع، تقاضا را در نظر گرفته و آن را با میزان استفاده مجدد در داخل گره، استراتژهای مدیریتی برای کاهش تقاضا و اتلاف‌های داخلی، تنظیم می‌کند.

$$MSR_{DS,m}=\frac{MSR_{DS,m}\times\left(1-RR_{DS}\right)\times\left(1-DSMS_{DS}\right)}{1-LR_{DS}} \tag{۲}$$

MSR، نیاز ماهیانه منبع، MD تقاضای ماهانه، RR نرخ استفاده مجدد، $DSMS$، ذخیره ماهانه در گره تقاضا و LR نرخ تلفات است. در این مرحله جریان‌های ورودی به گره‌ها و اتصالات در سیستم و خروجی از آنها برای ماه در نظر گرفته شده، محاسبه می‌شود. رابطه فوق شامل محاسبه آب‌های برداشت شده از منابع ذخیره برای تامین تقاضاها نیز می‌باشد. لذا به منظور تامین حداکثر مقدار نیازها با لحاظ محدودیت‌های تعریف شده، از یک برنامه خطی (LP) استفاده می‌شود. بنابراین، اگر DS گره تقاضا و Src منبع تغذیه باشد، رابطه زیر برقرار است:

$$I=\sum_{rcS}TLO_{Src.Ds} \tag{۳}$$

که در آن I ورودی و TLO جریان خروجی خط انتقال هستند. معادلات حاکم بر جریان خط انتقال، به صورت معادلات (۴) تا (۷) تعریف شده‌اند:

$$TLI_{Src,DS}=TLI_{Src,DS}-TLL_{Src,DS} \tag{۴}$$

$$TLL_{Src,DS}=\left(TLLfs_{Src,DS}+TLLtG_{Src,DS}\right)\times TLI_{Src,DS} \tag{۵}$$

$$TLI_{Src,DS}\leq MFV_{Src,DS} \tag{۶}$$

$$TLO_{Src,DS}\leq MFP_{Scr,DS}\times SR_{Scr,DS} \tag{۷}$$

در این معادلات، اندیس DS و Src، نشانگر جریان از منبع به گره تقاضا است. TLO خروجی از خط انتقال، TLI ورودی خط انتقال، TLL اتلاف آب در خط انتقال، $TLLfs$ اتلاف آب خط انتقال از سیستم، $TLLtG$ اتلاف آب خط انتقال که به منابع آب زیرزمینی می‌رود، MFV حداکثر حجم جریان، MFP حداکثر درصد جریان و SR نیاز منبع هستند. مقدار آب خروجی از مخزن نیز توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$O_{Rcs} = DO_{Rcs} + \sum_{DS} TLI_{Rcs,DS} \quad (۸)$$

در این رابطه، O جریان خروجی، DO جریان خروجی به پایین دست و TLI جریان خط انتقال از گره تقاضا SD است. این معادله با محدودیت زیر حل می‌شود که در آن $SAfR$ ذخیره موجود برای خروج از مخزن است.

$$O_{Rcs} \leq SAfR_{Rcs} \quad (۹)$$

همچنین از ابزار MABIA به منظور برآورد عملکرد و نیاز آبی محصولات و میزان آب در دسترس زیرحوضه‌های مختلف بهره گرفته شده است. روش MABIA یک شبیه‌سازی روزانه از تعرق، تبخیر، نیازمندی‌های آبیاری و برنامه‌ریزی، رشد محصول و بازده آن و همچنین شامل واحدهایی برای تخمین تبخیر و تعرق و ظرفیت آب خاک است. این مدل با نرم‌افزار MABIA در INAT برآورد شده است. در مطالعه‌ی حاضر از ابزار MABIA و تلفیق آن با مدل WEAP جهت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در سطح حوضه استفاده شده است.